

Stabilitätsbetrachtungen zu VSC-HGÜ-Systemen

Bachelorarbeit

Víctor Sanz López | 2958891

Institut für elektrische Energiesysteme

Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien

Betreuer: Julia Dragon

Abgabe: 18.07.2014



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Víctor Sanz López
Matrikelnummer: 2958891
Studiengang: Mechatronik-Student

Bachelorarbeit
Thema: "Stabilitätsbetrachtungen zu VSC-HGÜ-Systemen"

Eingereicht: 18. Juli 2014

Betreuer: Julia Dragon, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Straße 4
64283 Darmstadt



Darmstadt, 18.07.2014

Bachelorarbeit Nr. 694

für

Víctor Sanz López

Stabilitätsbetrachtungen zu VSC-HGÜ-Systemen

In Deutschland und Europa wird der zunehmende Einsatz von VSC-HGÜ-Systemen im Übertragungsnetz erwartet. Um die Stabilität von VSC-HGÜ-Systemen an sich und Stabilität des kombinierten AC/DC-Hybridsystems zu untersuchen, wird in dieser Bachelorarbeit ein VSC-HGÜ-System in MATLAB/Simulink aufgebaut und bezüglich seiner Stabilität untersucht.

Hierfür wird zunächst die Modellierung einer VSC-HGÜ-Umrichterstation sowie der DC-Leitung dargestellt. Anschließend wird ein Gesamtmodell in MATLAB/Simulink präsentiert und simuliert.

Ausgabetermin: 29.04.2014
Einlieferungstermin: 18.07.2014
Betreuung: M.Sc. Julia Dragon

Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson

Als meus pares, Luis i Pilar, i al meu germà, Daniel, pel seu suport infinit i incondicional durant tots aquests anys.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Sämtliche aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht.

Darmstadt, den 18. Juli 2014

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1 Einführung.....	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	2
1.3 Arbeitsstruktur.....	2
2 Modellbildung des untersuchten Systems.....	3
2.1 Teile des Systems.....	4
2.2 Übertragungsleitung.....	4
2.3 Umrichterstation.....	6
2.4 Dreiphasen AC-Seite.....	10
2.5 Regelung des VSC-Konverters.....	12
2.6 Gewünschten Ergebnisse.....	12
2.7 Reglertyp und Regelungsvariablen.....	13
3 Simulationen und Darstellung in Simulink®.....	15
3.1 Übertragungsleitung in Simulink®.....	15
3.2 Umrichterstation in Simulink®.....	17
3.3 Dreiphasen AC-Seite in Simulink®.....	19
3.4 Werte der elektrische Komponente.....	19
3.5 Untersuchte System in Simulink®.....	21
4 Analyse der Ergebnisse.....	23
4.1 Simplifizierte System ohne Übertragungsleitung.....	23
4.2 Simulationen Ergebnisse des untersuchten Systems.....	25
4.2.1 Ergebnisse des AC-Netzes.....	25
4.2.2 Ergebnisse der Gleichspannung.....	26
5 Abschluss.....	30
6 Zukünftige Arbeit.....	31
6.1 Erweiterung des Systems.....	31
6.2 Andere Regelungstechniken.....	32
7 Referenzen.....	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersysteme (Quelle: Referenz [4])	4
Abbildung 2: Elektrische Elemente der Übertragungsleitung (Quelle: Referenz [4])	4
Abbildung 3: Diagramm der Umrichterstation (Quelle: Referenz [4]).....	6
Abbildung 4: Vergleich zwischen abc und dq0 Achsensysteme.....	7
Abbildung 5: Blockschaltbild der Umrichterstation mit Regler (Quelle: Referenz [4])	1 0
Abbildung 6: Darstellung der Dreiphasen AC-Seite (Quelle: Referenz [4])	1 1
Abbildung 7: Darstellung der Phase Locker Loop (PLL) in Matlab/Simulink®.....	1 1
Abbildung 8: Sprungantwort ein IT-2-System und dessen Eigenschaften	1 3
Abbildung 9: Zustandsdarstellung der Übertragungsleitung (Simulink®).....	1 7
Abbildung 10: Blockschaltbild einer Umrichterstation (Simulink®)	1 8
Abbildung 11: Blockschaltbild einer AC-Netz (Simulink®).....	1 9
Abbildung 12: Untersuchtes System mit zwei Umrichterstationen (Simulink®).....	2 3
Abbildung 13: Blockschaltbild des Systems ohne Übertragungsleitung	2 3
Abbildung 14: Wurzelortskurve des Systems ohne Übertragungsleitung (Laplace-Bereich)	2 4
Abbildung 15: v_{gd1} , v_{gq1} und v_{g01} abhängig von der Zeit	2 6
Abbildung 16: Sprung der Spannung in der 2. Umrichterstation.....	2 7
Abbildung 17: Gleichspannung u_{s1} der 1. Umrichterstation.....	2 8
Abbildung 18: Gleichspannung u_{s2} der 2. Umrichterstation.....	2 8
Abbildung 19: Effekt der Sprung in der u_{s2} Gleichspannung	2 9
Abbildung 20: HGÜ-System mit drei Umrichterstationen (Quelle: Referenz [4])	3 1
Abbildung 21: Wurzelortskurve des System mit drei Umrichterstationen abhängig von k_{droop} (Quelle: Referenz [4])	3 2

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kirchhoffs Gleichungen und Kapazitätsgleichung der Übertragungsleitung.....	5
Tabelle 2: Gleichungen für die Zustandsraumdarstellung zu berechnen.....	5
Tabelle 3: Gleichungen für den Winkel des AC-Netzes.....	8
Tabelle 4: Werte der elektrischen Komponente.....	2 1

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
VSC	Voltage Source Converter (Spannungsquellekonverter)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
PLL	Phase Locked Loop
PI	Proportional und Integral Regler
i_{l1}	Strom durch die Leitung (Umrichterstation 1 Seite)
i_{l2}	Strom durch die Leitung (Umrichterstation 2 Seite)
L_l	Induktivität der Leitung
R_l	Widerstand der Leitung
C_l	Kapazität der Leitung
u_{s1}	Spannung der 1. Umrichterstation
u_{s2}	Spannung der 2. Umrichterstation
u_s^*	Spannung einer beliebigen Umrichterstation (Sollwert)
u_{Cl}	Spannung der beiden Leitungskapazitäten
i_c	Strom durch die Umrichterstationskapazität
i_m	Strom durch die Umrichterstation
i_s	Strom durch die AC-Leitung
v_m	Spannung der Umrichterstation in der AC-Seite
v_m^*	Spannung der Umrichterstation in der AC-Seite (Sollwert)
v_g	Spannung der AC-Seite
v_g^*	Spannung der AC-Seite (Sollwert)
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	a, b und c Phasenströme der AC-Seite
i_{sd}, i_{sq}	d und q Ströme der AC-Seite
i_{sd}^*, i_{sq}^*	d und q Ströme der AC-Seite (Sollwerte)
v_{md}, v_{mq}	d und q Spannungen des Konverters
v_{gd}, v_{gq}	d und q Spannungen der AC-Seite
R	Widerstand der AC-Leitung
L	Induktivität der AC-Leitung
C	Kapazität zwischen die Leitung und die Umrichterstation
ω	Frequenz der AC-Seite in rad/s
P_{mAC}, P_{mDC}	Leistungen der AC und DC Seiten
k_{pi}	Proportionale Anteil des PI-Reglers
k_{ii}	Integrale Anteil des PI-Reglers

V_{gaRMS}	RMS-Wert der a-Phasespannung in AC-Seite (Boden-Referenz)
I_{gaRMS}	RMS-Wert der a-Phasespannung in AC-Seite (Boden-Referenz)
φ_{va}	Winkel der a-Phasespannung in AC-Seite (Boden-Referenz)
φ_{ia}	Winkel des a-Phasestroms in AC-Seite (Boden-Referenz)
θ	Winkel des AC-Netzes
$x, X_0, \Delta x$	Beliebige Variable, Wert im Arbeitspunkt und Abweichung der Variable ($x=X_0+\Delta x$)
r	Widerstand einer km von DC-Leitung
l	Induktivität einer km von DC-Leitung
c	Kapazität einer km von DC-Leitung
U_{DC}	Base-Gleichspannung
V_{AC}	Base-Wechselspannung
P	Base-Leistung
H_c	Elektrostatische Konstante der Umrichterstation

1 Einführung

Der Eintritt in das 21. Jahrhundert hat viele neue Erfindungen gebracht, aber es gibt noch viele Probleme für die Zukunft. Die nicht erneuerbaren Energiequellen können bald der Vergangenheit angehören und jetzt kommt der Moment für neue Energien, um die ökologische Nachhaltigkeit in der Zukunft zu erreichen. Noch brauchen diese neuen Energien viele neue Entwicklungen in der Technik.

1.1 Hintergrund

Die Forschung über neue elektrische Netzwerke ist heutzutage ganz wichtig. Wegen der missbräuchlichen Verwendung von fossilen Brennstoffen (Öl, Gas und Kohle) und deren grundsätzlichen Begrenzung, gibt es jetzt nicht genug von diesen Brennstoffen und zusätzlich wird die Umwelt davon negativ beeinflusst. Die langfristige Lösung ist die Verwendung von erneuerbaren Energien. Um diese neuen Energiequellen zu verwenden, muss man neue Technologien und Infrastrukturen entwickeln. Die Europäische Union und deren Regierungen haben verschiedene Projekte wie die „Twenties Project“ (Referenz [1]) in den letzten Jahren entwickelt, damit die erneuerbaren Energiequellen stärker genutzt werden. Trotzdem gibt es noch viele kritische Aspekte, die untersucht werden sollen. Ein Beispiel dafür ist die Verbindung zwischen den Energiequellen und -verbrauchern. Damit diese neuen Energien Strom produzieren, soll man neue, leistungsfähige elektrische Konverter entwerfen. Die Verbraucher brauchen AC (Alternating Current) und manche Energiequellen, wie die Solarenergie, generieren DC (Direct Current). Schließlich, könnte die Übertragung von Strom mit elektrischen Leitungen wie in Referenz [2] steht entweder AC oder DC sein, weil für eine lange Distanz die Blindleistung in AC Leitungen zu hoch ist. Aus diesem Grund ist der Übergang zwischen AC und DC mit elektrischem Konverter und dessen Regelung von besonderer Bedeutung.

Wegen der Erfindungen in der Leistungselektronik seit den achtziger Jahren bis heute, gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, um von AC nach DC oder umgekehrt zu wechseln. Diese Technologien werden in den elektrischen Konvertern, die geregelte Geräte sind, angewendet. Es gibt verschiedene Arten von Konvertern, die für geregelte Netzwerke verwendet werden. Trotzdem existiert ein Konvertertyp (Referenz [3]), der oft angewendet wird: die VSC (Voltage Source Converter oder Spannungsquellekonverter). Dieser Konverter funktioniert für beide, AC/DC (Gleichrichter) und DC/AC (Wechselrichter), Stromsveränderungsprozesse.

Heutzutage gibt es Forschungsgruppen, die diesen VSC Konverter in HGÜ-Systeme (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) einsetzen wollen, um seine Funktionalität zu verwenden.

1.2 Aufgabenstellung

In dieser Bachelorarbeit werden die Analyse und die Regelung eines VSC-HGÜ-Systems präsentiert. Dieses System und die dazugehörige Regelung werden in der Forschung „Method for Small Signal Stability Analysis of VSC-MTDC grids“ (Referenz [4]) genannt. Es gibt auch wichtige Informationen in anderen Artikeln wie [5] und [6]. Das Ziel ist, verschiedene Umrichterstationen zu verbinden. Diese Umrichterstationen können entweder Generatoren oder Verbraucher sein. Die Leitung sollte vom Typ DC sein, um keine reaktive Leistung während der Übertragung zu generieren.

Das Ziel, das erreicht werden sollte, ist die Stabilität von elektrischen Variablen (Strom und Spannung) während dieses Übertragungsprozesses zu gewährleisten. Die Stabilität einer Variablen bedeutet, dass die Abweichung von dieser Variablen von einem stationären Zustand klein sein muss. Deshalb muss das geregelte System bei plötzlichen Veränderungen der Systemvariablen nach einer kleinen Schwingung sich stabilisieren. Die Abweichung während dieser Schwingung soll auch nicht groß sein, damit die Verbraucher den gewünschten Strom bekommen.

1.3 Arbeitsstruktur

Um das erwartete Ergebnis zu erreichen, wird diese Arbeit in verschiedene Kapitel strukturiert. Im Kapitel 2 wird die Erklärung über das untersuchte System und dessen Modellbildung dargestellt. Dieses System wird geteilt und die Modellbildung jedes Teiles wird präsentiert. Im Kapitel 3 gibt es eine Erklärung über die Regelung von diesem System und die gewünschten Ergebnisse.

Im Kapitel 4 präsentiert man die Simulationstechniken, Annahmen und Software, um die Ergebnisse zu bekommen. Im Kapitel 5 geben es die Analyse dieser Ergebnisse und der Vergleich mit der Aufgabenstellung. Zum Schluss gibt es im Kapitel 6 eine Zusammenfassung der Arbeit und im Kapitel 7 werden andere Möglichkeiten für die Zukunft präsentiert.

2 Modellbildung des untersuchten Systems

Um die Analyse und Regelung des Systems machen zu können, braucht man ein Modell dieses Systems. Es gibt viele verschiedene Darstellungen eines Systems. Manche sind einfacher zu verstehen und andere sind besser zu regeln. In dieser Sektion werden die wichtigsten Modellarten präsentiert. Es gibt verschiedene Darstellungen für ein Modell:

- Elektrisches Modell: Kabel, Widerstände, Induktivitäten, Kapazitäten, Konverter und Quellen.
- Blockschaltbild: Verstärkungen, Integratoren, Übertragungsfunktionen, Produkte und Addieren.
- Allgemeine Übertragungsfunktionen: Im Laplace-Bereich und als $G(s) = \text{Ausgang}(s) / \text{Eingang}(s)$. Es gibt eine Übertragungsfunktion für jede Kombination von Eingang und Ausgang des Systems.
- Zustandsraumdarstellung: Gleichungen mit Matrizen und drei Variablenarten (Eingänge, Ausgänge und Zustandsvariablen).

Man kann das System teilen und verschiedene Modelle bilden. Diese Teile sind einfacher zu verstehen und danach wird eine Verbindung gemacht, um das ganze Systemmodell zu haben. Es gibt auch verschiedene Methoden, um verschiedene Systeme zu verbinden:

- Blockschaltbilder: Ein großes Blockschaltbild mit kleinen Blockschaltbildern darin.
- Übertragungsfunktion des ganzen Systems: Alle Übertragungsfunktionen und Blockschaltbilder zusammenstellen mit mathematischen Operationen.
- Zustandsraumdarstellung des ganzen Systems: Mit Hilfe von Verbindungsmethoden von Matrizen wie in der Referenz [4], die allgemeine Zustandsraumdarstellungen berechnen.

Es existiert auch eine andere Möglichkeit, um Systeme zu verbinden. In dieser Arbeit wird der Matlab/Simulink® Programm verwendet. Man kann mit Matlab/Simulink® die Teile des Systems ohne mathematische Verfahren verbinden. Dieses macht das gesamte System anschaulich und einfacher zu analysieren, da die Untersysteme grafisch begrenzt sind.

2.1 Teile des Systems

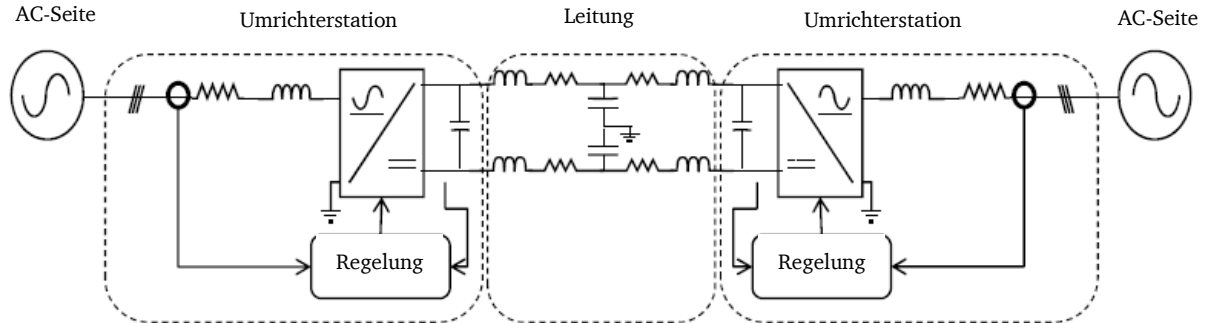


Abbildung 1: Untersysteme (Quelle: Referenz [4])

Das untersuchte System in Abbildung 1 hat zwei AC-Seiten, zwei Umrichterstationen und die Übertragungsleitung zu verbinden. Jede Umrichterstation hat ein VSC mit Regelung. Jetzt werden diese drei verschiedenen Teile modelliert.

2.2 Übertragungsleitung

Die Übertragungsleitung soll den Gleichstrom von einer Umrichterstation auf die andere übertragen. Diese Leitung könnte sehr lang sein, weil die Umrichterstationen weit voneinander liegen. Das heißt, dass diese Distanz z.B. 100 km sein könnte. In Abbildung 2 steht das Diagramm der Leitung.

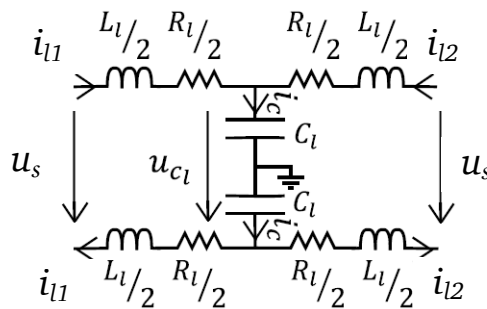


Abbildung 2: Elektrische Elemente der Übertragungsleitung (Quelle: Referenz [4])

Die Übertragungsleitung ist ein bipolares Kabel, das die gleichen Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten auf beiden Seiten hat. Ein bipolares Kabel ist ein Kabel mit zwei Leitungen verbunden mit zwei Kapazitäten. Ein solches Kabel hat die gleichen Werte für Ströme i_{l1} und i_{l2} auf beiden Seiten (obere und untere).

Mittels der Kirchhoffs Gleichungen von 1 bis 4 in Tabelle 1 kann man die Zustandsraumdarstellung von Gleichungen 8 und 9 berechnen. Um es zu machen, soll man die drei Ableitungen von i_{l1} , i_{l2} und u_{cl} trennen wie in Tabelle 2 (Gleichungen 5, 6 und 7).

Tabelle 1: Kirchhoffs Gleichungen und Kapazitätsgleichung der Übertragungsleitung

Gleichung	Gleichung Nummer	Erklärung
$i_c = i_{l1} + i_{l2}$	Gl. 1	Kirchhoff Ströme für obere Knoten (1. Kirchhoffsches Gesetz)
$u_{s1} = L_l \frac{di_{l1}}{dt} + R_l i_{l1} + u_{cl}$	Gl. 2	Maschenregel für 1. Masche (2. Kirchhoffsches Gesetz)
$u_{s2} = L_l \frac{di_{l2}}{dt} + R_l i_{l2} + u_{cl}$	Gl. 3	Maschenregel für 2. Masche (2. Kirchhoffsches Gesetz)
$i_c = \frac{C_l}{2} \frac{du_{cl}}{dt}$	Gl. 4	Kapazitätsgleichung

Tabelle 2: Gleichungen für die Zustandsraumdarstellung zu berechnen

Gleichung	Gleichung Nummer
$\frac{di_{l1}}{dt} = -\frac{R_l}{L_l} i_{l1} - \frac{1}{L_l} u_{cl} + \frac{1}{L_l} u_{s1}$	Gl. 5
$\frac{di_{l2}}{dt} = -\frac{R_l}{L_l} i_{l2} - \frac{1}{L_l} u_{cl} + \frac{1}{L_l} u_{s2}$	Gl. 6
$\frac{du_{cl}}{dt} = \frac{2}{C_l} (i_{l1} + i_{l2})$	Gl. 7

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{l1} \\ \dot{i}_{l2} \\ \dot{u}_{cl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L_l} & 0 & -\frac{1}{L_l} \\ 0 & -\frac{R_l}{L_l} & -\frac{1}{L_l} \\ \frac{2}{C_l} & \frac{2}{C_l} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ u_{cl} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_l} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_l} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{s1} \\ u_{s2} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$\begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{l1} \\ i_{l2} \\ u_{cl} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 9})$$

Die Übertragungsleitung hat die folgenden Variablen:

- Eingänge: u_{l1} und u_{l2} .
- Ausgänge: i_{l1} und i_{l2} .
- Zustandsvariablen: i_{l1} , i_{l2} und u_{cl} .

Wie man in Abbildung 4 sehen kann, dass die Phasoren von v_{ga} , v_{gb} und v_{gc} die Winkelgeschwindigkeit ω (Netzgeschwindigkeit oder Netzfrequenz) in der Referenz im Phasorenachsensystem haben. Das dq0-Achsensystem bewegt sich mit dieser Winkelgeschwindigkeit ω und aus diesem Grund bewegen sich die Spannungen in der neuen Referenz nicht. Die neuen Werte der Spannungen sind die Projektionen der alten v_{ga} , v_{gb} und v_{gc} Werte. Wenn die dq0-Achsen in einer bestimmten Position sind, dann ist die Projektion v_{gq} gleich 0 und v_{gd} eine Konstante. Die dritte Projektion v_{g0} ist immer 0 wegen der Park-Transformationsdefinition. In der Sektion 2.4 wird die Park-Transformation quantitativ beschrieben.

Die Park-Transformierung braucht ein Regelungssystem, das PLL genannt wird. Die PLL berechnet den Winkel zwischen der Dreiphasen AC-Seite Spannung und dem Strom, der für jede Phase gleich ist. Diesen Winkel kann man wie in Tabelle 3 (Gleichungen 10, 11 und 12) berechnen, in diesem Fall für Phase a.

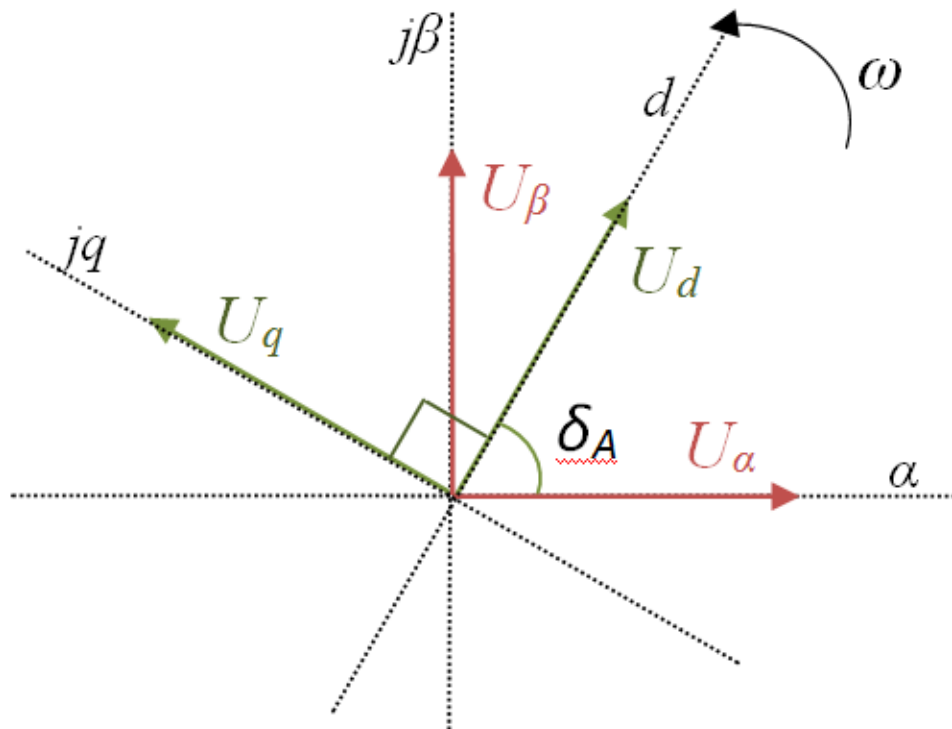


Abbildung 4: Vergleich zwischen abc und dq0 Achsensysteme

Tabelle 3: Gleichungen für den Winkel des AC-Netzes

Gleichung	Gleichung Nummer	Erklärung
$v_{ga}(t) = \sqrt{2}V_{gaRMS}\cos(\omega t + \varphi_v)$	Gl. 10	a-Phase Wechselspannung
$i_{ga}(t) = \sqrt{2}I_{gaRMS}\cos(\omega t + \varphi_i)$	Gl. 11	a-Phase Wechselstrom
$\theta = \varphi_v - \varphi_i$	Gl. 12	Winkel des AC-Netzes

Der Betrieb der Park-Transformierung und der PLL wird in Sektion 2.3 beschrieben. Mit dieser dq0-Variablen kann man diese VSC Konverter regeln. Die Variablen, die in Abbildung 3 gezeichnet werden, sind:

Spannungen:

- Die Spannung des Konverters v_m in AC-Seite.
- Die Spannung des Konverters u_s in AC-Seite.
- Der Sollwert der Spannung des Konverters u_s^* in AC-Seite.
- Der Sollwert der Spannung des Konverters v_m^* .
- Die Spannung des AC-Netzes v_g (Erde-Referenz).
- Der Sollwert der Spannung der AC-Netz v_g^* (Erde-Referenz).
- Die v_{md} und v_{mq} Spannungen des Konverters in AC-Seite.
- Die v_{gd} und v_{gq} Spannungen des AC-Netzes.

Ströme:

- Der Strom durch die Umrichterstationskapazität i_c .
- Der Strom durch die Umrichterstation i_m .
- Der Strom durch die DC-Leitung i_l .
- Der Strom durch AC-Leitung i_s .
- Die i_{sa} , i_{sb} und i_{sc} Phasenströme durch die AC-Leitung.
- Die i_{sd} , i_{sq} und i_{s0} Phasenströme durch die AC-Leitung nach der Park-Transformierung.
- Die Sollwerte i_{sd}^* , i_{sq}^* und i_{s0}^* Phasenströme durch die AC-Leitung nach die Park-Transformierung.

Elektrische Komponente und anderen Eigenschaften:

- Der Widerstand der AC-Leitung R .
- Die Induktivität der AC-Leitung L .
- Die Kapazität zwischen die Leitung und die Umrichterstation (parallel zum Konverter) C .

- Die Übertragungsfunktion des Reglers $C(s)$.
- Die Droop-Regelung-Parameter k_{droop} .

In Referenz [4] gibt es das Verfahren, um die Gleichungen von jeder Umrichterstation zu erhalten. Die Gleichungen von den AC und DC Seiten sind die folgenden (13 bis 17):

- AC-Seite in dq0-Frame: Mit die Park-Transformierung sind die Kirchhoffschen Regeln anders und werden in [7] beschrieben. In diesem Fall sind die Gleichungen 13 und 14 die neuen Maschenregeln für beide v_{md} und v_{mq} . Mit Gleichung 15 kann man die Leistung der AC-Seite erhalten.

$$v_{md} = v_{gd} + Ri_{sd} + L \frac{di_{sd}}{dt} - L\omega i_{sq} \quad (\text{Gl. 13})$$

$$v_{mq} = v_{gq} + Ri_{sq} + L \frac{di_{sq}}{dt} + L\omega i_{sd} \quad (\text{Gl. 14})$$

$$P_{mAC} = v_{md}i_{sd} + v_{mq}i_{sq} \quad (\text{Gl. 15})$$

- DC Seite: Gleichung 16 ist eine Eigenschaft einer Kapazität und mit Gleichung 17 kann man die Leistung der AC-Seite erhalten.

$$i_c = i_m - i_l = C \frac{du_s}{dt} \quad (\text{Gl. 16})$$

$$P_{mDC} = i_m u_s \quad (\text{Gl. 17})$$

Die Leistungen gleich sind. Deshalb ist $P_{mAC} = -P_{mDC}$ und gibt es Gleichung 12:

$$v_{md}i_{sd} + v_{mq}i_{sq} = -i_m u_s \quad (\text{Gl. 18})$$

Die Gleichung 12 ist nichtlinear und, aus diesem Grund, muss linearisiert sein, um lineare Regelung verwenden zu können. Diese Linearisierung funktioniert gleich für alle Variablen (Spannung und Strom) und steht in Gleichung 13. Mit diesem Ansatz ist jede Variable x gleich dem Wert im Arbeitspunkt X_0 plus eine Abweichung Δx .

$$x = X_0 + \Delta x \quad (\text{Gl. 19})$$

Mit dieser Linearisierung kann man noch mal Gleichung 18 berechnen. Nach der Vernachlässigung von den 2.Ordnung-Elemente wie $\Delta i_{sd}\Delta v_{md}$ und der Annahme, dass die Leistungen in AC und DC Seite gleich sind, erhält man Gleichung 14.

$$V_{md0}\Delta i_{sd} + I_{sd0}\Delta v_{md} + V_{mq0}\Delta i_{sq} + I_{sq0}\Delta v_{mq} = -U_{s0}\Delta i_m - I_{m0}\Delta u_{s0} \quad (\text{Gl. 20})$$

Zum Schluss, wie oben in dieser Sektion und Abbildung 4 beschrieben wird, sind die d und q Achsen unabhängig und die q Variablen 0. In Abbildung 3 kann man ein Diagramm von jeder

Umrichterstation sehen. Dieses Diagramm hat ein Droop, PI (Proportional und Integral) Stromregelkreis und Leistungskreis, die später beschrieben werden.

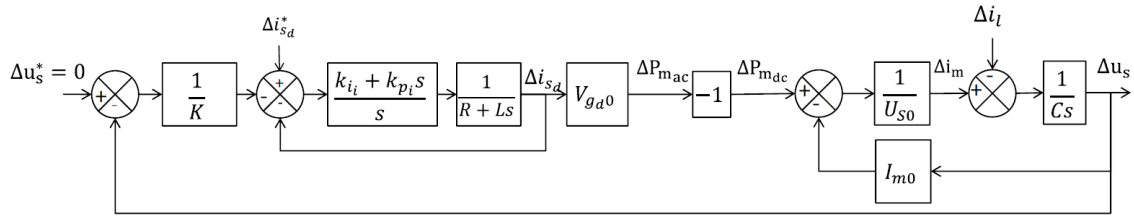


Abbildung 5: Blockschaltbild der Umrichterstation mit Regler (Quelle: Referenz [4])

Dieses Blockschaltbild in Abbildung 5 ist eine Zusammenfassung der 20. Gleichung und hat die folgenden Eigenschaften:

- Der Sollwert Δu_s^* (Spannungsabweichung der Substation in DC-Seite) soll 0 sein, damit es Gleichspannung gibt.
- Der Droop-Parameter K und der PI-Regler regeln den Strom.
- Der Δi_{sd}^* kommt von der AC-Leitung durch der Park-Transformierung.
- Wegen $P_{mAC} = -P_{mDC}$ gibt es eine Verbindung zwischen dem Stromkreis und dem Leistungskreis.

Die Variablen jeder Umrichterstation sind die folgenden:

- Eingänge: Δi_{sd}^* und Δi_l .
- Ausgänge: Δu_s .

Man kann dieses Diagramm in Abbildung 4 simplifizieren und die zwei Übertragungsfunktionen in Gleichungen 15 und 16 berechnen.

$$G_{S1}(s) = \frac{\Delta u_s(s)}{\Delta i_l(s)} = - \frac{U_{s0} L s^2 + U_{s0} (R + k_{pi}) s + U_{s0} k_{ii}}{U_{s0} C L s^3 + (U_{s0} C (R + k_{pi}) + I_{m0} L) s^2 + \left(U_{s0} C k_{ii} + I_{m0} (R + k_{pi}) + \frac{V_{gd0} k_{pi}}{k} \right) s + I_{m0} k_{ii} + \frac{V_{gd0} k_{ii}}{K}} \quad (\text{Gl. 21})$$

$$G_{S2}(s) = \frac{\Delta u_s(s)}{\Delta i_{sd}^*(s)} = - \frac{V_{gd0} k_{pi} s + V_{gd0} k_{ii}}{U_{s0} C L s^3 + (U_{s0} C (R + k_{pi}) + I_{m0} L) s^2 + \left(U_{s0} C k_{ii} + I_{m0} (R + k_{pi}) + \frac{V_{gd0} k_{pi}}{k} \right) s + I_{m0} k_{ii} + \frac{V_{gd0} k_{ii}}{K}} \quad (\text{Gl. 22})$$

2.4 Dreiphasen AC-Seite

Die AC-Seite hat drei Phasen mit Spannungsquellen, Widerständen und Induktivitäten, die in Abbildung 6 gesehen werden können.

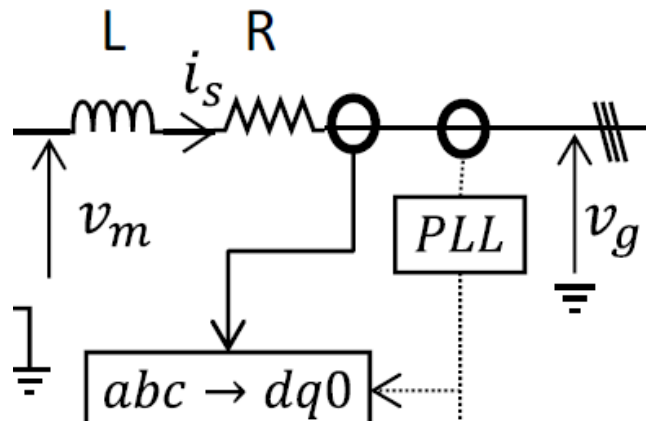


Abbildung 6: Darstellung der Dreiphasen AC-Seite (Quelle: Referenz [4])

Um die Regelung des VSC zu machen, braucht man die Park-Transformierung. Mit Hilfe der Gleichung 17 kann man die i_{sa} , i_{sb} und i_{sc} zu i_{sd} , i_{sq} und i_{s0} Variablen transformieren. θ ist der Winkel des AC-Netzes. Man kann diesen Winkel mit einer PLL wie in Abbildung 6 berechnen.

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 23})$$

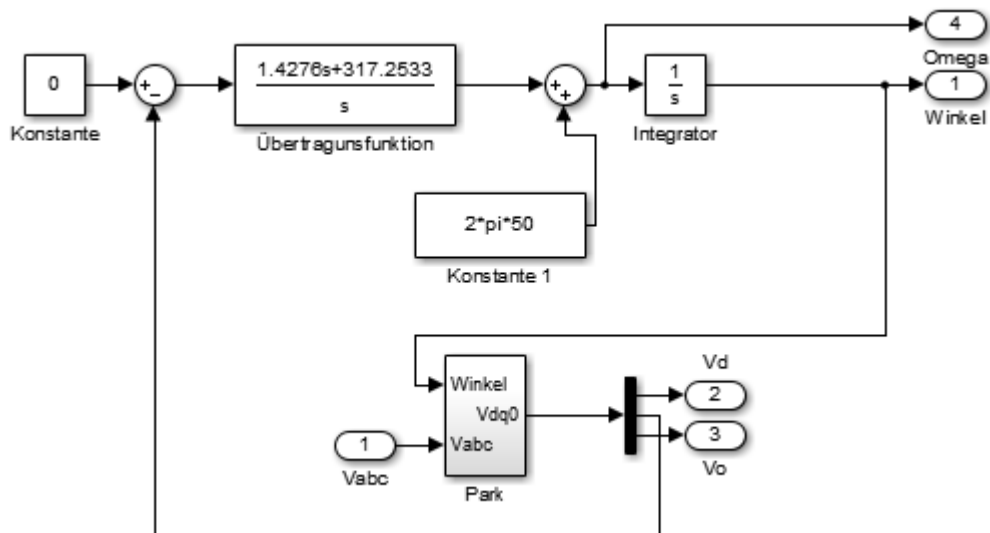


Abbildung 7: Darstellung der Phase Locker Loop (PLL) in Matlab/Simulink®

Mit dieser Park-Transformierung ist das neue dq0-Achsensystem mit dem abc-Achsensystem synchronisiert. Deshalb ist die d-Komponente eine Konstante und die q und 0 Komponenten null. Diese d-Komponente ist anwendbar zu regeln.

2.5 Regelung des VSC-Konverters

In dieser Sektion wird die Regelung des VSC-Konverters beschrieben. Wegen der Linearisierung des Umrichterstationsmodells kann man lineare Regelungsmethoden verwenden. Mit dieser Regelung soll man die Strecke stabilisieren und auch die richtigen Ergebnisse erreichen. In dieser Sektion gibt es eine Erklärung zu diesem Thema.

2.6 Gewünschten Ergebnisse

Das untersuchte System soll stabil sein, auch wenn es eine Veränderung in den Variablen gibt. Ein System ist stabil, wenn für beliebige Eingänge die Ausgänge des Systems in stationärem Zustand mehr oder weniger konstant bleiben. Die Stabilität eines Systems ist die Fähigkeit sich von selbst zu stabilisieren.

Die Stabilität ist in HGÜ-Systemen wichtig, weil die Geräte der Verbraucher aufgrund von großen Veränderungen der elektrischen Variablen zerstört werden können. Diese Veränderungen könnten eintreten, wenn es ein elektrisches Problem gibt. Zum Beispiel, wenn eine AC-Seite plötzlich außer Betrieb gerät. Diese Ereignisse destabilisieren das System, und der Regler soll es wieder stabilisieren und einen stationären Zustand erreichen.

Um die Gründe der Systemdynamik zu beschreiben, wird in Abbildung 8 ein Beispielsystem dargestellt. Dieses System ist ein IT-2-System. Am Anfang gibt es eine Schwingung und später erreicht das System den stationären Zustand. Wenn man ein System untersucht, gibt es nach einer Sprungantwort (Abbildung 7), folgende wichtige Messungen:

- Stationärer Zustand: Moment, wenn die Antwort einen konstanten Wert hat.
- Anstiegszeit: Zeit bis wann die Antwort denselben Wert hat wie im stationären Zustand.
- Maximale Überschwingung: Distanz von dem Wert im stationären Zustand bis zu dem Maximalen Antwortwert.
- Anregelzeit ($\pm 2\%$): Zeit bis wann der Antwortwert $\pm 2\%$ des Stationärswertes ist.

Dieses Verhalten kann in einem Beispiel in Abbildung 7 gesehen werden. Von links nach rechts gibt es die verschiedenen Zustände. Diese sind die Anstiegszeit, die maximale Überschwingung, die Anregelzeit ($\pm 2\%$) und der stationäre Zustand.

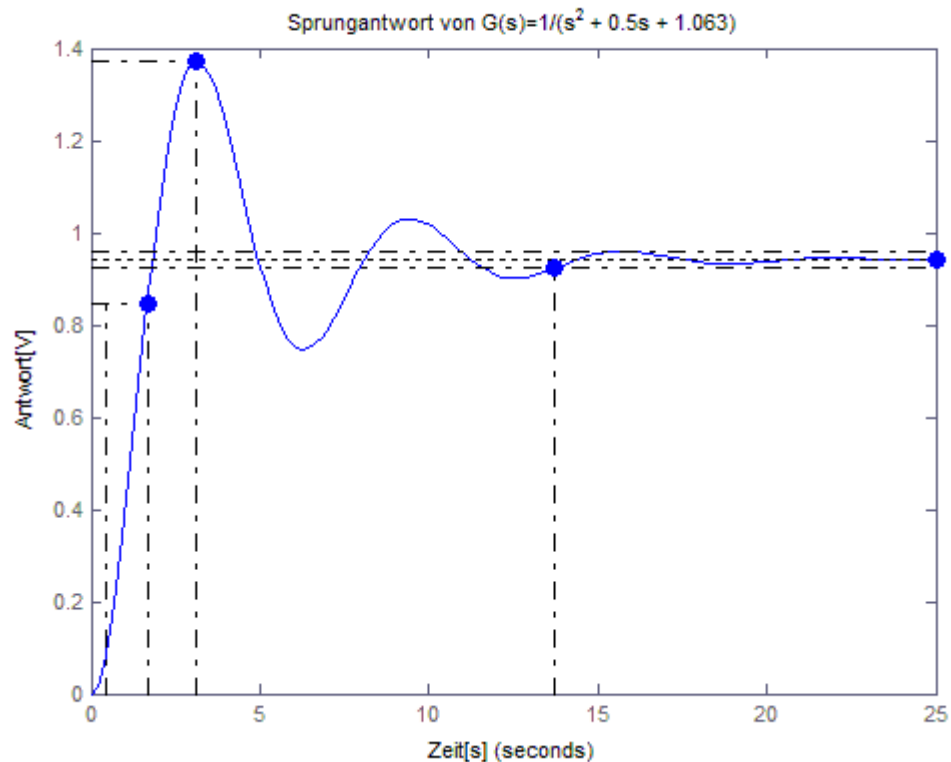


Abbildung 8: Sprungantwort ein IT-2-System und dessen Eigenschaften

Dieses Beispielsystem ist einfach und dessen Verhalten theoretisch. Deshalb ist eine Analyse des IT-2-Beispielsystem deutlich, aber die Analyse des untersuchten Systems ist komplizierter. Das untersuchte HGÜ-System soll auch einen stationären Zustand erreichen und deswegen braucht man einen Regler.

2.7 Reglertyp und Regelungsvariablen

Im Kapitel 2 werden die Untersysteme dargestellt. Die Stabilität der Konverter der Umrichterstationen ist das Wichtigste. Aus diesem Grund soll man einen Regler entwerfen, damit der Konverter richtig funktioniert und das System sich stabilisiert. Wegen der Linearisierung des Systems kann man lineare Regelungstechniken verwenden.

Viele verschiedene Regelungsmethoden sind möglich, um ein lineares System zu regeln. Im Zeitbereich sind die berühmtesten Reglertypen die P, PI, PD und PID. Diese Regler kombinieren die Proportionale P, Integrale I und Derivative D Anteile. In dieser Arbeit wird ein PI-Regler verwendet wie in Referenz [4]. Es wird auch ein Droop-Parameter verwendet, der eine Verstärkung ist.

In Abbildung 5 steht, dass der Reglertyp ein PI für Strom ist. Ein Droop-Parameter wird auch vor dem Regelkreis verwendet. Dieser PI-Regler sieht wie in der Gleichung 18. aus

$$G_c(s) = \frac{k_{ii} + k_{pi}s}{s} \text{ (Gl. 18)}$$

Die k_{ii} , k_{pi} und K (Droop) Parameter werden gewählt, damit das System sich stabilisiert. Nun sind die Modelle und Ziele vorbereitet und die Analyse kann anfangen.

3 Simulationen und Darstellung in Simulink®

Um die Stabilität des untersuchten Systems zu analysieren, wird das Programm Matlab/Simulink® verwendet. Die Untersysteme werden in einem Simulink®-File dargestellt und verbunden. Nach diesem Schritt wird man mit numerischen Methoden des Programms die Lösung finden, um anschließend die Ergebnisse im Kapitel 5 zu beschreiben und zu kommentieren.

Um ein Simulink®-Modell in einem Simulink®-File darzustellen, braucht man Blockdiagramme, die aus verschiedenen Bibliotheken kopiert werden. Diese Blockdiagramme und deren Eigenschaften können verändert werden. In den Bibliotheken gibt es Elemente wie folgt:

- Quellen: konstanter Wert, Sprung, Wiederholungssequenz.
- Verstärkungen
- Übertragungsfunktionen: Nenner und Zählerpolynome im Laplace-Bereich.
- Zustandsraumdarstellungen: $dx/dt=Ax+Bu$; $y=Cx+Du$ und Anfangsbedingungen hinzufügen.
- Multiplexer und Demultiplexer: um Signale zu trennen bzw. zu verbinden
- Addierern und Subtrahierern
- Multiplifizierungsblöcke
- Messen-Blocken: Scopes oder Variablen speichern.

Mit all diesen Elementen kann man das Modell bauen.

3.1 Übertragungsleitung in Simulink®

Die Übertragungsleitung in Abbildung 2 wird mit der Zustandsraumdarstellung in Gleichungen 8 und 9 beschrieben. Um die Übertragungsleitungsmodell in Simulink® zu entwerfen, braucht man den Zustandsraumblock („State-Space“ auf Englisch). Um Matrizen zu beschreiben, fügt man Klammern am Anfang und am Ende hinzu. Jede Zeile ist mit Semikolon getrennt und die Elemente in jeder Zeile werden durch Leerzeichen oder Kommas getrennt. Die Gleichungen $dx/dt=Ax+Bu$ und $y=Cx+Du$ sind wie Gleichungen 8 bzw. 9. In diesem Fall sind die Variablen wie folgt:

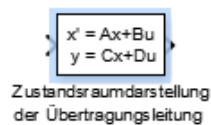
- Zustandsvektor x : Variablen i_{l1} , i_{l2} und u_{cl} .
- Eingänge u : Variablen u_{s1} und u_{s2} .

-
- Ausgänge y: Variablen i_{l1} und i_{l2} .

Wie in Abbildung 9 steht, sind die Eigenschaften des Zustandsraumblocks in Simulink®:

- A-Matrix: Erste Matrix der Gleichung 8 (3x3-Matrix).
- B-Matrix: Zweite Matrix der Gleichung 8 (3x2-Matrix).
- C-Matrix: Erste Matrix der Gleichung 8 (2x3-Matrix).
- D-Matrix: Zweite Matrix der Gleichung 8. 2x2-Matrix mit allen Nullelementen.
- Anfangsbedingungen („initial conditions“): $U_{s0}=U_{DC}$ (Basis-Gleichspannung in Tabelle 4) und Ströme 0 am Anfang.
- Absolute Toleranz („Absolute tolerance“): Toleranz der Ergebnisse. Für diesen Fall soll die Toleranz „auto“ sein.
- Zustandsname („State name“): Name des Zustands. “ bedeutet es wird kein Name angegeben.

In Abbildung 9 gibt es links den Zustandsraumblock. In der linken Seite soll dieser Block mit den Eingängen verbunden werden und in der rechten Seite mit den Ausgängen. Die rechte Seite der Abbildung 9 beschreibt das Eigenschaftensfenster von diesem Block.



Function Block Parameters: Zustandsraumdarstellung der Ü...

State Space

State-space model:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Parameters

A:

Ac

B:

Bc

C:

Cc

D:

Dc

Initial conditions:

[0; 0; UDC]

Absolute tolerance:

auto

State Name: (e.g., 'position')

..

? OK Cancel Help Apply

Abbildung 9: Zustandsdarstellung der Übertragungsleitung (Simulink®)

Um die Eingänge und Ausgänge zu verbinden, braucht man jeweils ein Demultiplexer bzw. ein Multiplexer.

3.2 Umrichterstation in Simulink®

Das untersuchte System hat zwei Umrichterstationen, die gleich sind. Jedes Umrichterstationsmodell wird schon in Kapitel 2 erwähnt und hier in Abbildung 10 mit einem Blockschaltbild dargestellt. In Simulink werden folgende Blockelemente verwendet:

- Verstärkung („gain“): $1/k_{droop}$, V_{gd0} , -1 , $1/U_{s0}$ und I_{m0} .
- Übertragungsfunktion („transfer function“): PI-Regler, Admittanz (AC-Seite) und Kapazität (DC-Seite).
- Konstante: 0 für Δu_s^* .

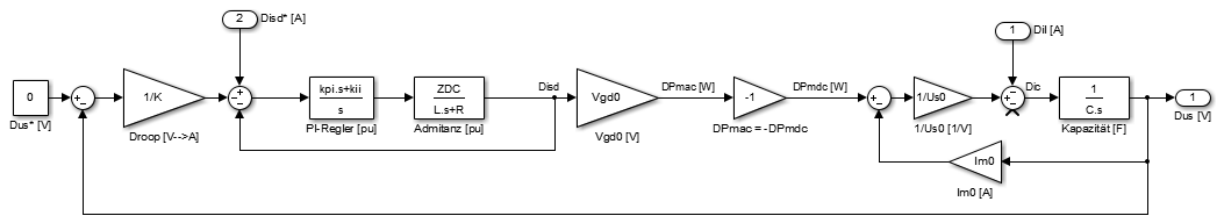


Abbildung 10: Blockschaltbild einer Umrichterstation (Simulink®)

In den Eigenschaften der Blockelemente sollen die konstanten Werte (Verstärkung und Konstante) oder die Nenner und Zähler der Übertragungsfunktion (in Klammern und mit Leerzeichen oder Kommas getrennt) eingegeben werden.

Das Untersystem in Abbildung 10 hat drei Regelkreise:

- Eine Regelung mit PI-Regler für AC-Seite, um Δi_{sd} (Abweichung der d-Strom durch die AC-Seite) zu kontrollieren.
- Ein Regelkreis für die DC-Seite, der eine Kapazität verwendet.
- Eine Rückführung von Δu_s bis zum Droop-Parameter. Δu_s^* ist 0, da die u_s Spannung Gleichspannung sein sollte.

Δi_l und Δu_s werden mit der Leitung und Δi_{sd}^* mit der AC-Seite jeweils verbunden.

Während der Analyse der Ergebnisse kann man die Werte der Droop und des PI-Reglers ändern, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Die anderen Blöcke sind:

- Verstärkung V_{gd0} (in V) multipliziert Δi_{sd} und das Ergebnis ist ΔP_{mac} (in W).
- Verstärkung -1, weil $\Delta P_{mac} = -\Delta P_{mdc}$.
- Verstärkung $1/U_{s0}$, um die Ergebnis Δi_s zu erhalten.
- Wie in Gleichung 16, $i_c = i_m - i_l = C \frac{du_s}{dt}$. Aus diesem Grund braucht man ein Subtrahierer und die Übertragungsfunktion der Kapazitätsgleichung. Die Anfangsbedingung (Anfangswert von Δu_s) ist 0.
- Die Rückführung multipliziert Δu_s und die Verstärkung I_{m0} . Diese Rückführung kontrolliert die DC-Leistung.
- Zum Schluss, die große Rückführung multipliziert Δu_s und -1/Droop.

3.3 Dreiphasen AC-Seite in Simulink®

Das System braucht die Park-Variablen. Deshalb kommen nach den Dreiphasenquellen die Park-Transformierung und die PLL. Die Umrichterstationen brauchen die Δi_{sd1}^* und Δi_{sd2}^* Variablen, die nach der Park-Transformierung konstant sind (Kapitel 2). Aus diesem Grund, wenn v_{gd1} und v_{gd2} Konstante sind, dann sind i_{sd1}^* und i_{sd2}^* auch Konstante. Nach diesem Test der d-Konstanten kann man es simplifizieren wie $\Delta i_{sd1}^* = 0$ und $\Delta i_{sd2}^* = 0$. In diesem Fall, um die Stabilität zu prüfen, wird man einen Sprung im Δi_{sd2}^* -Eingang einfügen.

Um die AC-Seite in Simulink zu bauen, braucht man:

- Drei Spannungsquellen für die Spannungen v_{ga} , v_{gb} und v_{gc} . Die Amplitude ist $V_{AC} \cdot 2^{1/2}$ (Tabelle 4) und die Frequenz 50 Hz. Die Anfangsphase ist 0.
- Phase Locked Loop (PLL, Abbildung 7), um der Winkel zu berechnen (Erklärung im Kapitel 2).
- Die Park-Transformierung wie in Gleichung 23, um die Park-Variablen zu berechnen.
- Zwei Demultiplexer.

Dieses Untersystem wird in Abbildung 11 dargestellt.

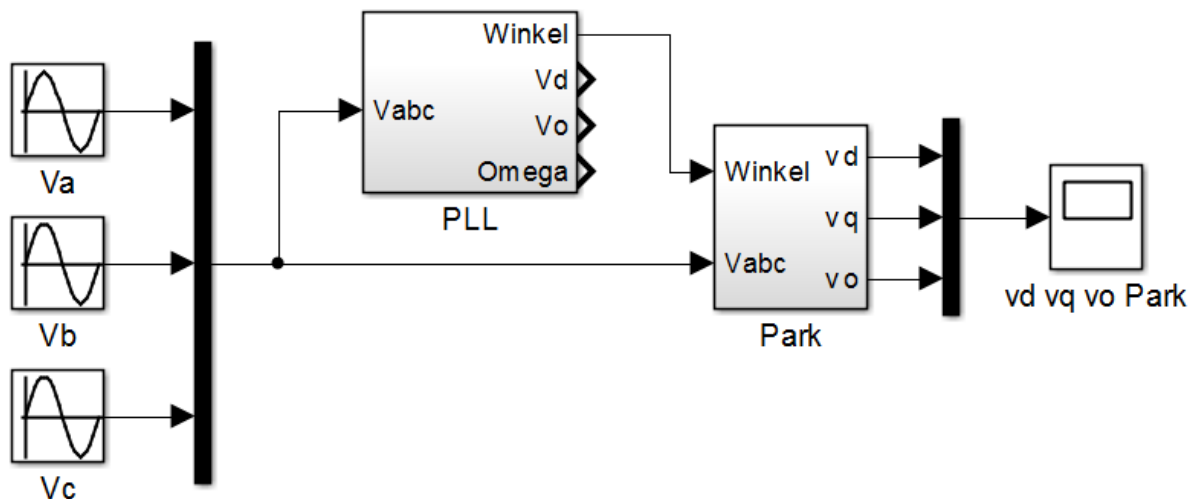



Abbildung 11: Blockschaltbild einer AC-Netz (Simulink®)

3.4 Werte der elektrische Komponente

Um das System zu simulieren, braucht man bestimmte Werte der elektrischen Komponenten wie Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten. Man soll auch die Werte des PI-Reglers und die Basis-Werte der Spannungen und Leistung bestimmen. Diese Werte kommen aus der



Referenz [4] und werden mittels der Ergebnisse überprüft. Diese Werte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Werte der elektrischen Komponente

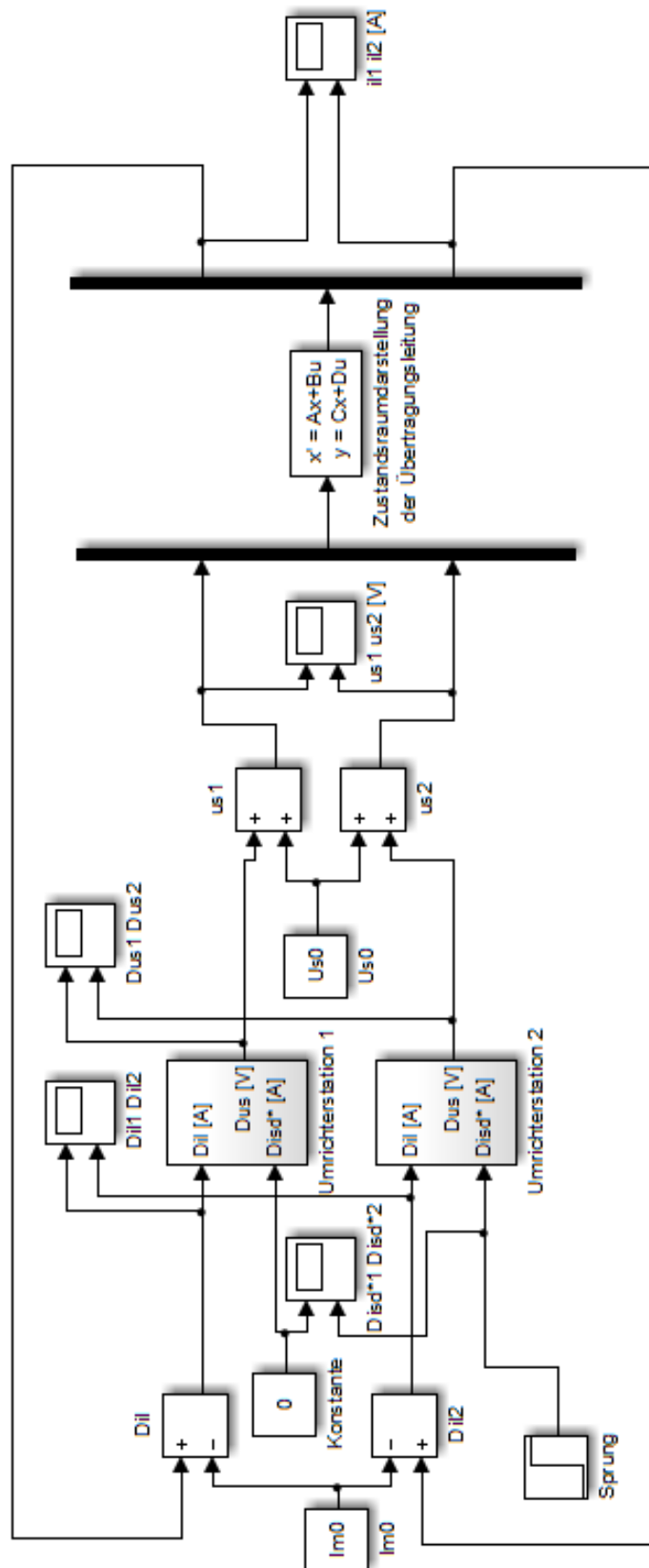
Konstante	Wert	Erklärung
R	0,005 pu	Widerstand jeder Umrichterstation
L	0,3 pu	Induktivität jeder Umrichterstation
C	50 μF	Kapazität jeder Umrichterstation
k_{ii}	85 pu	Proportionaler Anteil des PI-Reglers
k_{pi}	0,4 pu	Integraler Anteil des PI-Reglers
r	5 m/km	Widerstand der DC-Leitung
l	4 m/km	Induktivität der DC-Leitung
c	0,24 $\mu\text{F/km}$	Kapazität der DC-Leitung
d	100 km	Länge der Leitung
U_{DC}	640 kV	Base-Gleichspannung
V_{AC}	320 kV	Base-Wechselspannung
P	1000 MW	Base-Leistung

3.5 Untersuchte System in Simulink®

Das System mit zwei Substationen ist in Abbildung 12. dargestellt. Dieses Modell hat die folgenden Teile:

- Zwei Umrichterstationen.
- Zustandsraumdarstellung der Übertragungsleitung.
- Konstanten Arbeitspunktwerte, um die Abweichungen zu berechnen.
- Multiplexer und Demultiplexer.
- Addierern und Subtrahierern.

Die Sprungantwort entsteht in der 2. Umrichterstation und multipliziert die Δi_{sd2}^* für einen Sprung mit einer Verstärkung von 500 in der Sekunde 0.5.



4 Analyse der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Systems dargestellt und analysiert. Im Normalfall sind die Eingänge des Systems Konstante, nämlich die Δi_{sd}^* (Abweichung der d-Dreiphasenkomponente der Strom) der beiden Umrichterstationen. Das Ziel ist, das System zu stabilisieren, wenn es eine Abweichung Δi_{sd}^* gibt. Diese Stabilisierung ist wichtig, weil den Verbraucher keine großen Steigerungen der Spannung erreichen sollen. Der Grund ist, dass diese plötzlichen Veränderungen der elektrischen Variablen die elektrischen Geräte zerstören könnten. Der Droop-Parameter ist, wie in Referenz [4], $k_{droop}=0,66$.

4.1 Simplifizierte System ohne Übertragungsleitung

Vor der Analyse kann man eine Analyse eines Simplifizierten Systems durchführen. Dieses System hat keine Übertragungsleitung, um die Stabilität ohne Leitung zu prüfen. Deshalb sind die zwei Umrichterstationen verbunden. Die Gleichspannungen und Gleichströme sind gleich ($u_s=u_{s1}=u_{s2}$ und $i_l=i_{l1}=i_{l2}$). Man kann eine neue Variable definieren. Diese ist die elektrostatische Konstant H_c (Gleichung 19).

$$H_c = \frac{1}{2} C \frac{U_{DC}}{P} \text{ (Gl. 19)}$$

In Referenz [4] gibt es einen typischen Wert für $H_c=10$ ms. In Referenz [4] steht, dass das Blockschaltbild des Simplifizierten Systems wie in Abbildung 13 ist.

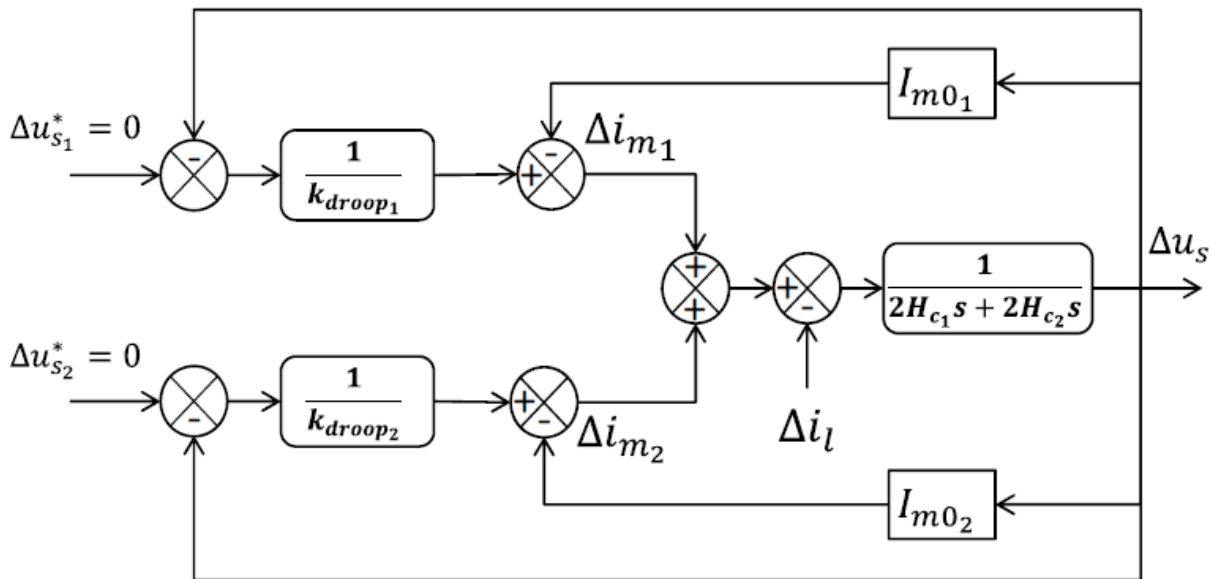


Abbildung 13: Blockschaltbild des Systems ohne Übertragungsleitung

Jede Umrichter Station hat eine H_c . Um es zu analysieren, ist es besser $H_c=H_{c1}=H_{c2}$ zu haben. Es ist auch möglich die Annahme $I_{m0}=I_{m01}=I_{m02}$ zu treffen. Anschließend kann man die Übertragungsfunktion des Systems im Laplace-Bereich erhalten (Gleichung 20).

$$G_{Simp}(s) = \frac{\Delta u_s}{-\Delta i_l} = \frac{k_{droop}/2}{1+2k_{droop}H_c s} \quad (\text{Gl. 20})$$

Diese Übertragungsfunktion in Gleichung 20 hat nur eine Wurzel im Nenner und ist wie Gleichung 21.

$$s = \frac{-1}{2k_{droop}H_c} = \frac{-1}{2 \cdot 0,66 \cdot 0,01} = -75,76 < 0 \quad (\text{Gl. 21})$$

Diese Wurzel (oder Pole) ist negativ. Wegen der Theorie der Systemdynamik sind Systeme mit negativen Polstellen im Laplace-Bereich stabil. Dieses Verhalten wird in Abbildung 14 (Wurzelortskurve) dargestellt. Deshalb ist das simplifizierte System stabil.

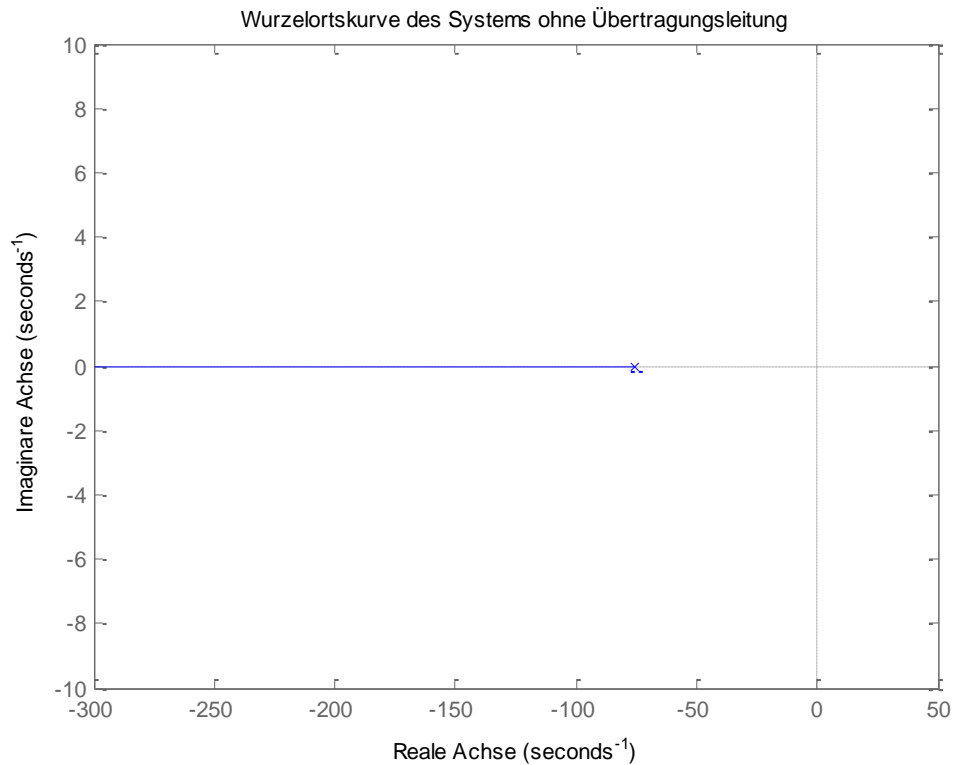


Abbildung 14: Wurzelortskurve des Systems ohne Übertragungsleitung (Laplace-Bereich)

4.2 Simulationen Ergebnisse des untersuchten Systems

In dieser Sektion werden die Simulationsergebnisse des untersuchten Systems beschrieben. In jeder Untersektion werden die theoretische und simulierte Verhalten verglichen. Das Ziel ist, wie in den vorherigen Sektionen beschrieben wird, die Stabilität des Systems zu erreichen. Es gibt zwei wichtige Ergebnisse, die in drei Untersektionen geteilt werden.

4.2.1 Ergebnisse des AC-Netzes

Im Kapitel 2 wird erklärt, dass nach der Park-Transformierung die Dreiphasenvariablen Konstante sind. Wenn nach der Simulation des Systems in Abbildung 11 dieses Verhalten richtig ist, kann man das System wie in Abbildung 12 simplifizieren. In diesem Fall ist das erste AC-Netz nicht verändert, da es direkt mit der ersten Umrichterstation verbunden wird. In die Zweite Umrichterstation wird ein Sprung hinzufügt, um die Stabilität der Gleichspannung u_{s1} zu untersuchen. Deshalb wird in dieser Sektion das erste AC-Netz analysiert.

Die Ausgänge sind v_{gd1} , v_{gq1} und v_{g01} , wenn die Eingänge die Dreiphasenspannungen v_{ga1} , v_{gb1} und v_{gc1} sind. Theoretisch ist das Verhalten diesen Variablen:

- v_{gd1} ist eine Konstante in stationärem Zustand. Der theoretische Wert ist $v_{gd1} = V_{AC} \cdot 2^{1/2}$. Mit den Werten in Tabelle 4 $v_{gd1} = 320 \cdot 10^3 \cdot 2^{1/2} = 452548,34$ V.
- v_{gq1} ist 0 in stationärem Zustand.
- v_{g01} ist 0 wegen der Definition der Park-Transformierung.

Die Ergebnisse der Simulation (v_{gd1} , v_{gq1} und v_{g01} Werte) sind in Abbildung 15. Die Eigenschaften der Simulationsergebnisse sind:

- v_{gd1} (rote Linie) ist eine Konstante und $v_{gd1} \approx 452550$ V. Deshalb ist dieses Ergebnis richtig und fast wie theoretisch.
- v_{gq1} (grüne Linie) schwingt ein bisschen und $v_{gq1} \in [89,7; -739]$ V. Im Vergleich mit $v_{gd1} \approx 452550$ V ist diese $v_{gq1} \approx -400$ V mehr oder weniger eine Konstante.
- v_{g01} (rote Linie) ist 0 wegen der Definition der Park-Transformierung, wie im theoretischen Fall.

Die Simulationsergebnisse sind nicht die theoretischen, aber fast gleich. Die Analyse war erfolgreich und man kann die Simplifizierung von Abbildung 12 verwenden. Diese Analyse der Spannungen v_{gd1} , v_{gq1} und v_{g01} ist auch richtig für die Ströme, da es nur

Widerstand und Induktivität in der AC-Leitung gibt. Deshalb sind die Eingänge der Umrichterstationen:

- $\Delta i_{sd1}^* = 0$ in der erste Umrichterstation.
- Δi_{sd1}^* ein Sprung mit Verstärkung 500 in Sekunde 0,5.

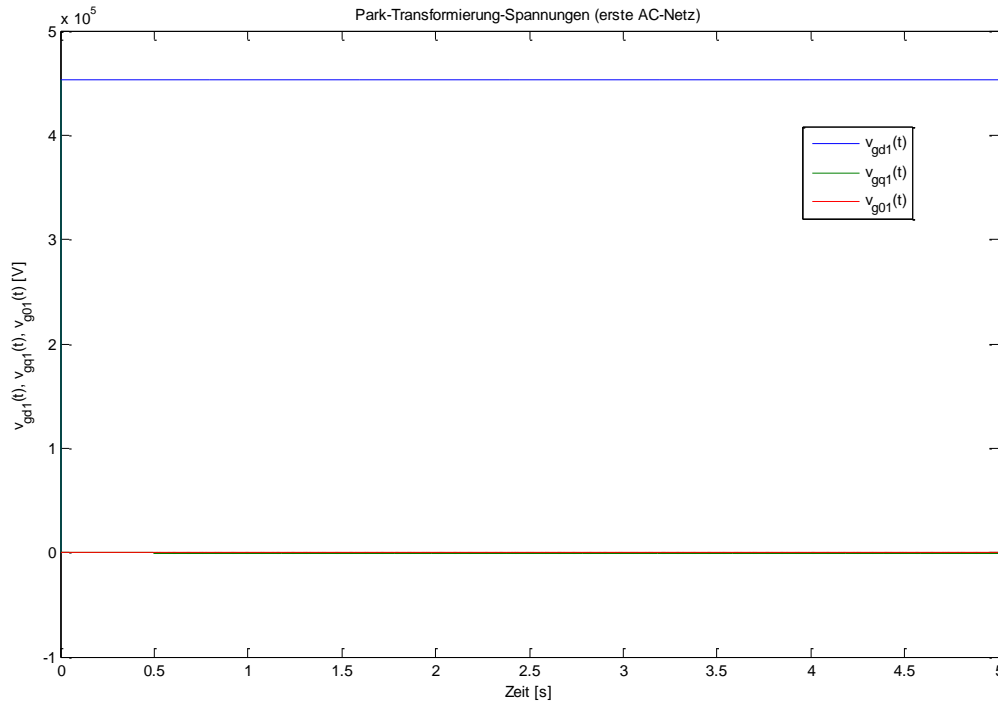


Abbildung 15: v_{gd1} , v_{gq1} und v_{g01} abhängig von der Zeit

4.2.2 Ergebnisse der Gleichspannung

Im Kapitel 1 wird erklärt, dass für längere Distanzen die Spannungen und Ströme der Leitung konstant sein sollten. Der Grund ist, dass die Blindleistung, die nicht verwendet werden könnte, niedrig sein sollte. Die Blindleistung existiert nur für Wechselspannung und je kleiner die Schwingung der Spannung ist, desto niedriger ist die Blindleistung. Deshalb sollten die Spannungen u_{s1} und u_{s2} Gleichspannungen sein.

Das Verhalten der Spannungen in beiden Umrichterstationen ist wie folgt:

- Die erste Umrichterstation hat $\Delta i_{sd1}^* = 0$. Deswegen gibt es keinen Sprung und diese Spannung soll sich stabilisieren und einen stationären Zustand erreichen. Der stationäre Wert soll theoretisch wie U_{DC} in Tabelle 4 sein.

- Die zweite Umrichterstation hat Δi_{sd2}^* 0 bis zur Sekunde 0,5. Ab Sekunde 0,5 ist $\Delta i_{sd2}^* = 500$. Dieser Sprung ist in Abbildung 16. Nach Sekunde 0,5 soll die Spannung schwingen und einen neuen stationären Wert erreichen.

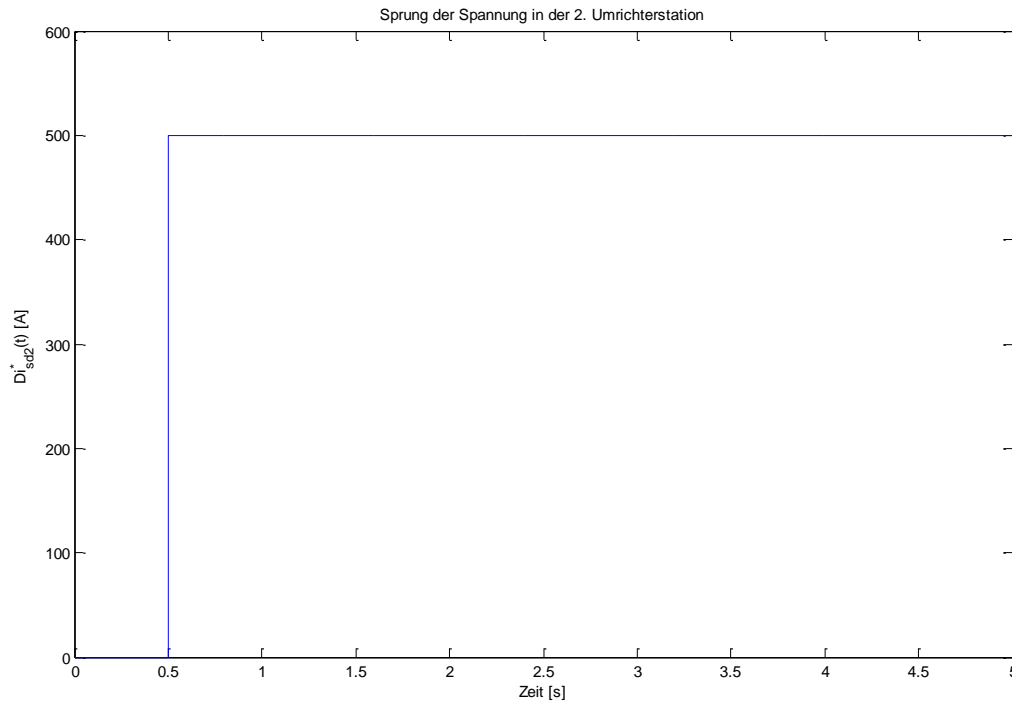


Abbildung 16: Sprung der Spannung in der 2. Umrichterstation

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildungen 17 und 18 wie folgt:

- In Abbildung 17 kann man sehen, dass der stationäre Wert fast wie die $U_{AC}=640$ kV. Dieser Wert ist $u_{s1}=640,01$ kV und ist konstant.
- In Abbildung 18 geht die Spannung ein bisschen nach unten nach dem Sprung in Sekunde 0,5. Nach diesem Sprung erreicht die Spannung einen neuen stationären Zustand. In Abbildung 19 ist dieser Sprung deutlicher und auch der Endwert $u_{s2}=640,0025$ kV.

Zusammenfassend wird die Stabilität erreicht und die Werte in stationärem Zustand sind auch gut. Deshalb kann man sagen, dass die verwendete Regelung funktioniert.

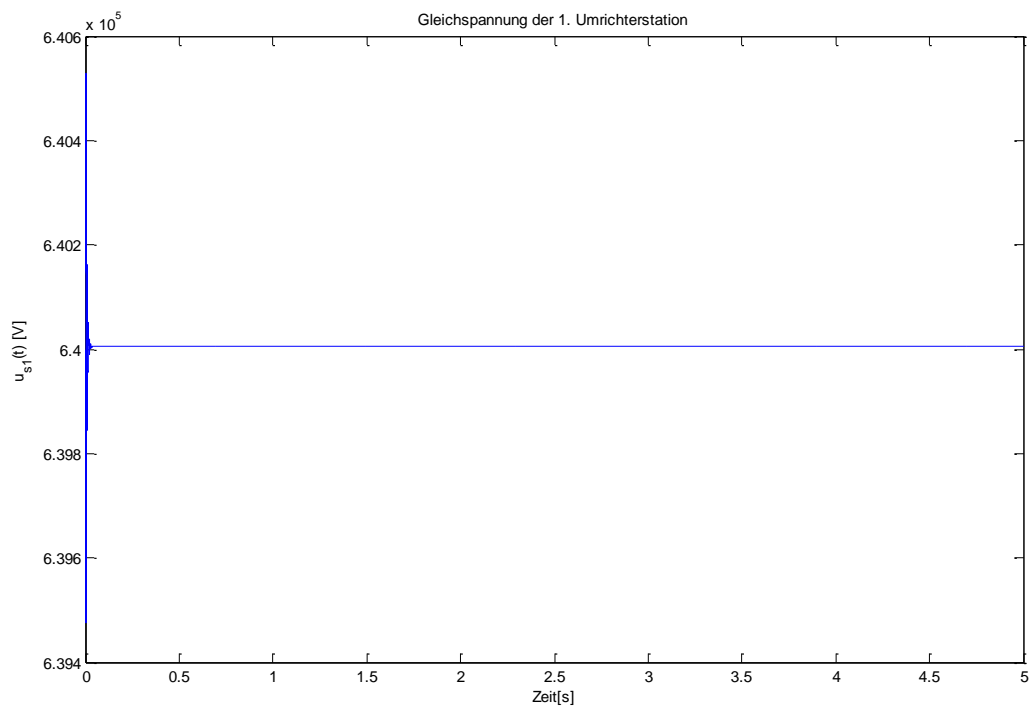


Abbildung 17: Gleichspannung u_{s1} der 1. Umrichterstation

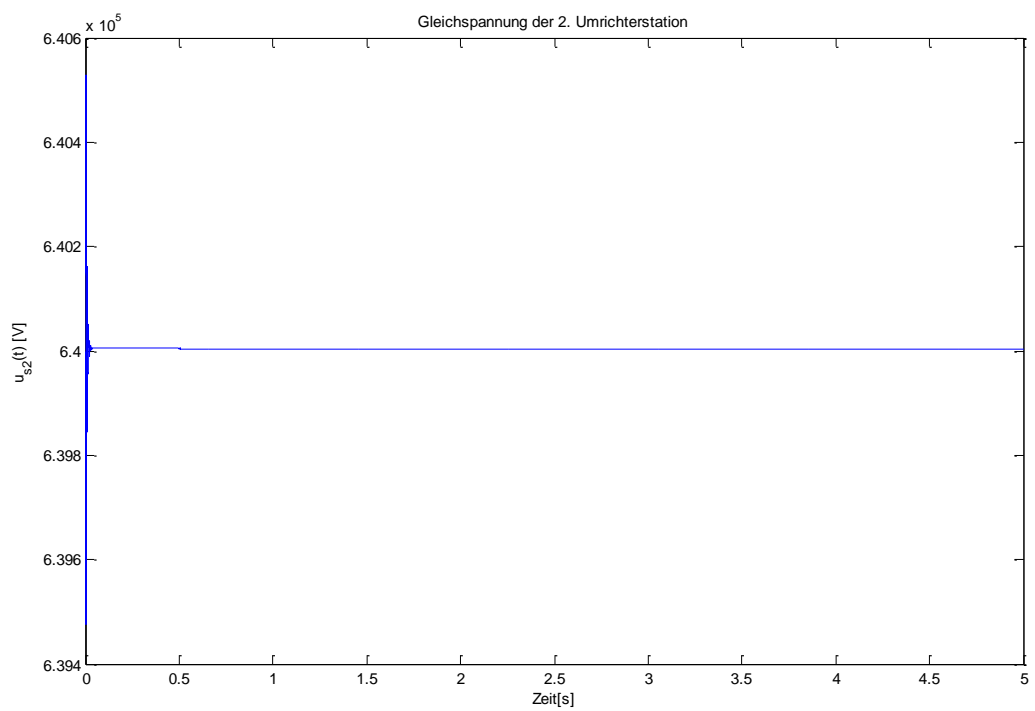


Abbildung 18: Gleichspannung u_{s2} der 2. Umrichterstation

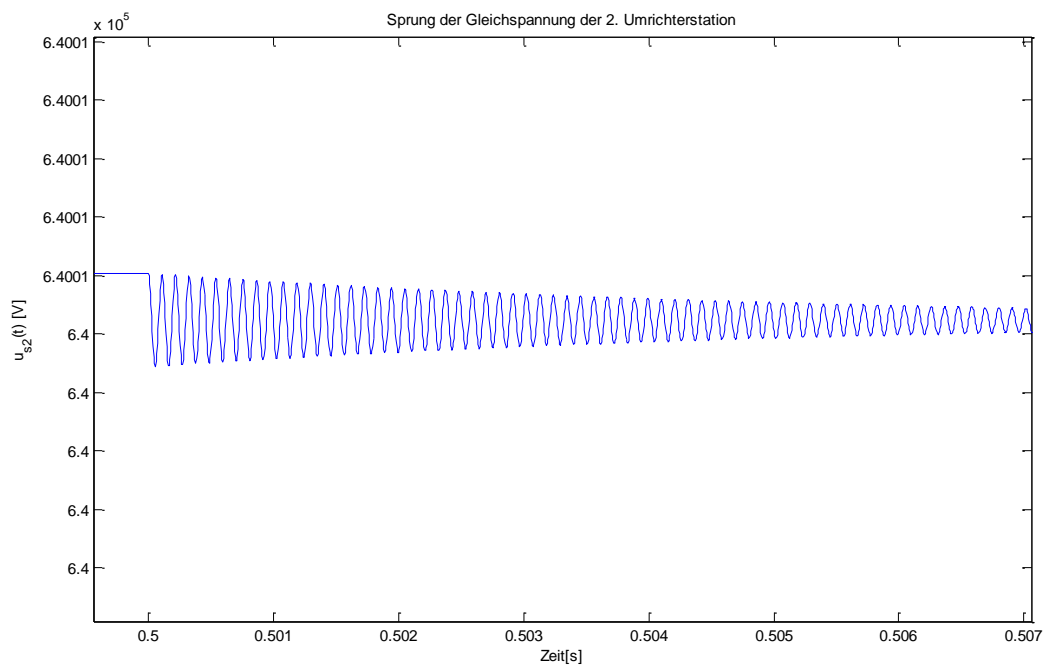


Abbildung 19: Effekt der Sprung in der u_{s2} Gleichspannung

5 Abschluss

In dieser Arbeit wird eine Stabilitätsanalyse eines HGÜ-Systems mit zwei Umrichterstationen untersucht. Zuerst gibt es eine Einführung über die Tragweite der HGÜ-Systeme in heutigen Energieprojekten. Es wird auch die Stabilität in HGÜ-Systemen behandelt, da diese von zunehmender Bedeutung für heutige Lösungen sind. Danach werden verschiedene Modellbildungstechniken und deren Simulationstechniken präsentiert, um ein gutes Modell des Systems zu erhalten.

Zum Schluss wird ein Droop und PI-Regler präsentiert, um das untersuchte System zu stabilisieren, und mit Hilfe des Matlab/Simulink® Programms die Ergebnisse analysiert und die Stabilität überprüft. Nach dieser Analyse kann man sagen, dass die Ergebnisse erfolgreich sind, da nach Veränderungen der Eingänge des Systems, dieses noch stabil ist. Aus diesem Grund, liefert diese Arbeit einen guten Ansatz, um weiter in dieser Richtung zu forschen.

6 Zukünftige Arbeit

In dieser Arbeit wurde ein HGÜ-System mit zwei Umrichterstationen analysiert. Es gibt auch verschiedene Modellbildungsmethoden, die in dieser Arbeit genannt wurden. Alle diese Möglichkeiten könnten in neuen Forschungsarbeiten untersucht werden. Es wäre sinnvoll, diese neuen Wege zu verfolgen, um neue Erkenntnisse zu gewinnen.

6.1 Erweiterung des Systems

In [4] gibt es eine Analyse mit Wurzelortskurve eines Systems, das drei Umrichterstationen hat. In Abbildung 15 wird ein Diagramm des HGÜ-Systems dargestellt und in Abbildung 16 dessen Wurzelortskurve. Dieses System wird in [4] analysiert und enthält eine Umrichterstation für Windmühlen und zwei Netzverbindungen.

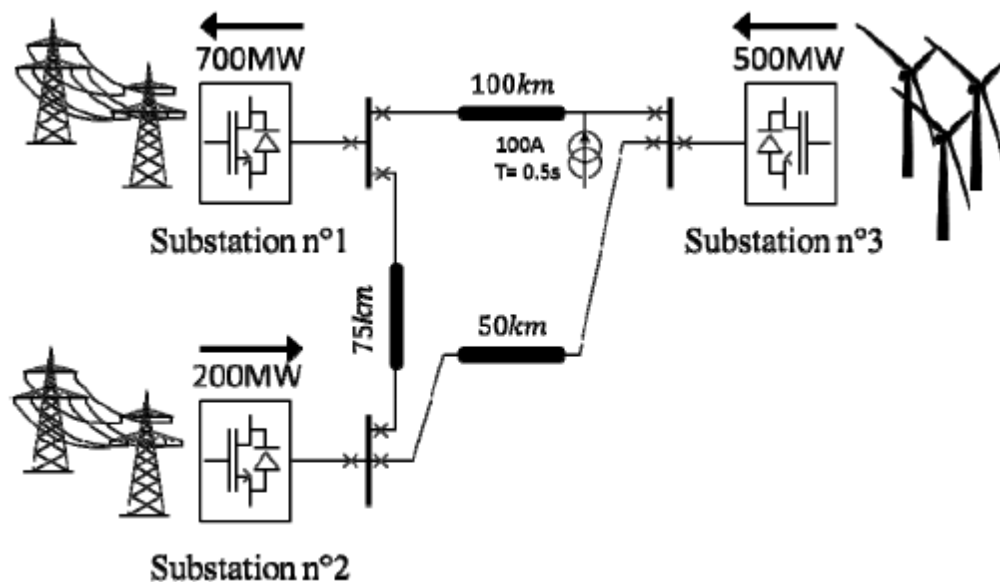


Abbildung 20: HGÜ-System mit drei Umrichterstationen (Quelle: Referenz [4])

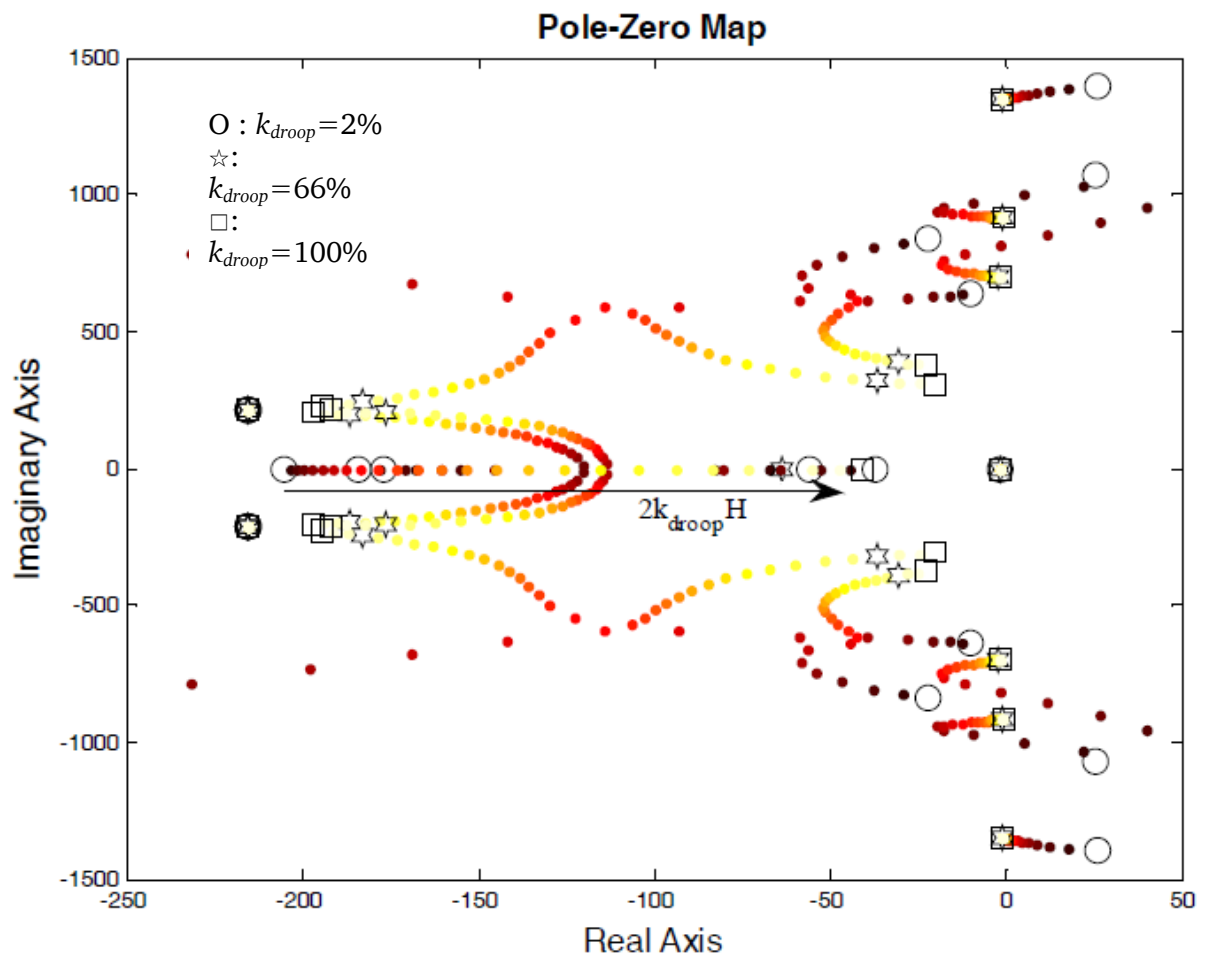


Abbildung 21: Wurzelortskurve des System mit drei Umrichterstationen abhängig von k_{droop} (Quelle: Referenz [4])

Um die Wurzelortskurve zu erhalten, braucht man die allgemeine Zustandsraumdarstellung des Systems. Um dieses Modell zu erhalten, wird in [4] das Verbindungsverfahren für Zustandsraumdarstellung vom Kapitel 2 verwendet. In Abbildung 15 kann man sehen, dass mit $k_{droop}=66\%$ die Wurzelortskurve links von $\text{Re}\{s\}=0$ im Laplace-Bereich ist. Aus diesem Grund ist das System stabil für $k_{droop}=66\%$.

Diese Analyse ist aber nicht komplett und es könnte zukünftige Forschung geben, um diese zu verbessern. Eine volle Analyse der PI-Regler und der Droop-Parameter wäre eine gute Idee.

6.2 Andere Regelungstechniken

Zum Schluss wäre es auch eine gute Entscheidung, andere Regelungstechniken zu gebrauchen, um die beste Lösung für das untersuchte Problem zu finden. In den Referenzen [5], [6] und [8] werden andere Möglichkeiten verwendet und erklärt. Die

Regelungstechniken in [8] sind ganz anders, da es in diesem Artikel eine optimierte Regelung gibt.

7 Referenzen

- [1] **Europäische Kommission:** Twenties Project. www.twenties-project.eu.
- [2] **Renewable Grid Initiative (2010):** Transmission Technologies and Technical Developments: Cable vs. Overhead - AC vs. DC - Innovations. Background paper for the RGI (Renewables Grid Initiative) Workshop.
- [3] **Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann (2010):** Perspektiven der HGÜ-Technik-Overlaynetz (380 V). Institut für Energie-, Antriebs- und Umweltsystemtechnik. Technische Universität Ilmenau. Konferenzvortrag.
- [4] **P. Rault, F. Colas, X. Guillaud, S. Nguefeu (2012):** Method for Small Signal Stability Analysis of VSC-MTDC grids. Konferenzpaper.
- [5] **P. Rault, F. Colas, X. Guillaud, S. Nguefeu (2012):** Investigation on interactions between AC and DC grids. Konferenzpaper.
- [6] **Giddani O. Kalcon, Grain P. Adam, Olimpo Anaya-Lara, Stephen Lo, Kjetil Uhlen (2012):** Small-Signal Stability Analysis of Multi-Terminal VSC-Based DC Transmission Systems. Konferenzpaper.
- [7] **Agustí Egea-Álvarez, Adrià Junyent-Ferré, Oriol Gomis-Bellmunt (2011):** Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems. Konferenzpaper.
- [8] **Robert Eriksson, Jef Beerten, Mehrdad Ghandhari, Ronnie Belmans (2014):** Optimizing DC Voltage Droop Settings for AC/DC System Interactions. Konferenzpaper.